Härte und Häufigkeit der von der kosmischen Ultrastrahlung ausgelösten Schauer

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von

Helmut Weiß
aus Stuttgart

1 9 4 0

Buchdruckerei Albert Becht, Tübingen, Hirschgasse 16

Gedruckt mit Genehmigung der Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen.

Dekan: Prof. Dr. E. Hennig

Berichterstatter: Prof. Dr. E. Back

Tag der mündlichen Prüfung: 23. Februar 1939

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Inhalt.

Seite

§ 1. Einleitung 5
§ 2. Experimentiertechnisches 6
§ 3. Bisher ausgeführte Absorptionsmessungen 7
§ 4. Herstellung der günstigsten Versuchsbedingungen 8
§ 5. Berücksichtigung des Nulleffekts 11
§ 6. Ergebnisse für Schauer aus Blei und Aluminium 13
§ 7. Grundlagen des Versuchs zur Messung der Schauerhäufigkeit . . . 18
§ 8. Häufigkeit der Schauer aus Blei und Aluminium 20
§ 9. Zusammenfassung 24

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41549608_0156

§ 1. Einleitung.

Die Strahlenschauer sind eine für den Komplex der kosmischen Ultrastrahlung besonders charakteristische Erscheinung. Sie bestehen, wie die Wilson-Aufnahmen [1]) unmittelbar erkennen lassen, aus Gruppen von Strahlen, die gleichzeitig von einem oder mehreren Punkten einer von der Ultrastrahlung durchsetzten Metallschicht ausgehen. Im allgemeinen ist die Zahl der Strahlen im Schauer klein, doch kommen auch Schauer mit vielen hunderten von Strahlen vor [2]) (Hoffmann'sche Stöße). Die Strahlen selbst sind in der Hauptsache positive und negative Elektronen von teilweise sehr erheblicher Energie (bis 10^9 eV). Außerdem ist aber jeder Schauer von einer großen Zahl von Photonen begleitet [3]), die ihrerseits wieder Photo- und Compton-Elektronen auslösen [4]).

Obwohl das Schauer-Phänomen schon seit 10 Jahren bekannt ist [5]) [6]), macht seine Deutung heute noch große Schwierigkeiten. Zwei grundsätzlich verschiedene Theorien werden zur Zeit viel diskutiert. Nach Bhabha und Heitler [7]) baut sich ein Schauer im Metall schrittweise aus Bremsquanten und Elektronenpaaren auf, während er nach Heisenberg [8]) das Ergebnis eines explosionsartigen Vorgangs sein kann, der durch ein sehr energiereiches Primärteilchen im Feld eines Atomkerns ausgelöst wird. Wahrscheinlich kommen Schauer beider Entstehungsarten vor [9]).

---

1) P.M.S. Blackett u. G.P.S. Occhialini, Proc.Roy.Soc. London (A) 139, 699, 1933.

2) Siehe z. B. C.D. Anderson u. S. H. Neddermeyer, Phys. Rev. 50, 263, 1936.

3) H. Geiger u. O. Zeiller, ZS. f. Phys. 108, 212, 1938.

4) Siehe z. B. C. D. Anderson u. Mitarb., Phys. Rev. 45, 352, 1934.

5) D. Skobelzun, ZS. f. Phys. 54, 686, 1929.

6) B. Rossi, Phys. ZS. 33, 304, 1932 u. Rend. Linc. 15, 734, 1932.

7) H. I. Bhabha u. W. Heitler, Proc. Roy. Soc. London (A) 159, 432, 1937.

8) W. Heisenberg, ZS. f. Phys. 101, 533, 1936.

9) Vgl. die letzte zusammenfassende Arbeit von Euler und Heisenberg, Ergebnisse d. exakt. Naturw. XVII, 1, 1938.

Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, die Häufigkeit der Schauer und die Härte der Schauerstrahlen möglichst genau zu bestimmen. Dabei wurde eine Methode benutzt, die wesentlich höhere Koinzidenzzahlen ergab als die früheren Meßverfahren. Es konnte daher in wesentlichen Punkten eine größere Meßgenauigkeit erzielt werden.

§ 2. Experimentiertechnisches.

Die ersten Versuche wurden in einem Dachraum des Instituts ausgeführt, dessen Betondecke eine Dicke von etwa 35 cm hatte und darum selbst als Schauerquelle wirkte. Für den Hauptteil der Messungen stand jedoch auf dem Dach des Instituts ein zu diesem Zweck errichtetes Holzhaus mit nur 2 cm starkem Holzdach zur Verfügung. Dort wurden ohne schauerauslösendes Material nur sehr wenige Schauer registriert, während im Institutsraum relativ viele Schauer aus der Decke beobachtet wurden [10]).

Die Messungen wurden mit Zählrohren aus 0,25 mm starkem Messing von 3 cm Durchmesser und 20 cm Länge ausgeführt, die in Glas eingeschmolzen und mit 9 cm Hg technischem Argon und einem Zusatz von 1 cm Alkohol gefüllt waren; außerdem wurden kleinere Zählrohre benutzt, bei denen der Durchmesser 1,5 cm, die Länge 17 cm und die Wandstärke 0,5 mm betrug.

Die Trennung der verhältnismäßig sehr seltenen Schauer von der großen Zahl von Einzelstrahlen erfolgte durch Registrierung koinzidierender Impulse in mehreren Zählrohren [11]). Hierzu diente ein nach Johnson und Street [12]) gebauter Verstärker, dessen Auflösungsvermögen sich aus einer Registrierung zufälliger Zweifachkoinzidenzen zu $2 : 10^{-5}$ sec ergab. Der Verstärker in Verbindung mit mechanischen Addierwerken gestattete die gleichzeitige Registrierung von 5 beliebigen Koinzidenzkombinationen von 5 Zählrohren, wobei auch zwei oder mehr Zählrohre zu einer Gruppe parallelgeschaltet werden konnten.

10) Vgl. K. Barschauskas, ZS. f. Phys. 107, 713, 1937.

11) W. Bothe u. W. Kolhörster, ZS. f. Phys. 56, 751, 1929.

12) T. H. Johnson u. J. C. Street, Journ. of the Franklin Institute 215, 239, 1933.

§ 3. Bisher ausgeführte Absorptionsmessungen.

Die Absorption eines Schauers und damit die mittlere Absorbierbarkeit eines Schauerstrahls läßt sich unmittelbar mit der Ionisationskammer messen, denn hier ist die Abnahme der Gesamtionisation hinter einem eingebrachten Absorber ein Maß für die durch den Absorber bedingte Abnahme der Intensität. Nie[13]) und Messerschmidt[14]) finden auf diese Weise für Hoffmannsche Stöße und für Blei als Absorber eine mittlere Reichweite der Strahlen von etwa 5 cm.

Die meisten Absorptionsmessungen sind jedoch mit Zählrohren in Koinzidenzschaltung ausgeführt worden. Bei dieser viel empfindlicheren Methode ist die Koinzidenzzahl ein Maß für die Anzahl der austretenden Schauer und die Abnahme der Koinzidenzzahl beim Einschalten eines Absorbers ein Maß für die Absorbierbarkeit der Schauerstrahlen. Dies trifft allerdings nur dann zu, wenn man mit dem Absorber nur eines der Zählrohre überdeckt. Ueberdeckt man aber 2 bzw. 3 Zählrohre, so errechnet man aus der Abnahme der Koinzidenzzahl einen doppelten bzw. dreifachen Absorptionskoeffizienten, wie von Zeiller[15]) näher ausgeführt wurde.

Außerdem ist bei allen Absorptionsmessungen an Schauerstrahlen zu beachten, daß die Schauerstrahlen selbst wieder imstande sind, Sekundärstrahlen auszulösen, die auch rückwärts gestreut[16]) werden können. Die Anordnung muß daher so getroffen werden, daß die Absorption nicht durch die Sekundärstrahlung aus dem Absorber verdeckt wird.

Die ersten quantitativen Absorptionsversuche sind von Zeiller[15]) ausgeführt worden. Bei ihm befanden sich unter der schauerauslösenden Bleischicht drei Zählrohre; zwei davon lagen dicht unter der Bleischicht, das dritte in größerem Abstand darunter. Es wurden Dreifachkoinzidenzen gezählt, wobei die Absorptionsschichten von 0,5 bis 7 cm Pb dicht über dem untersten Rohr

13) H. Nie, ZS. f. Phys. 99, 776, 1936.

14) W. Messerschmidt, ZS. f. Phys. 103, 27, 1936.

15) O. Zeiller, ZS. f. Phys. 96, 121, 1935.

16) E. Fünfer, ZS. f. Phys. 83, 92, 1933 und E. Heidel, Diss. Tübingen 1935.

eingeschaltet wurden. Dabei ergab sich mit wachsender Absorberdicke eine Abnahme des Absorptionskoeffizienten von 0,5 bis 0,2 cm^{-1} Pb. Mit einer ähnlichen Anordnung fanden Morgan und Nielsen[17]) bei Messungen bis zu 0,5 cm Bleidicke einen Absorptionskoeffizienten von 0,47 cm^{-1} Pb und Clay[18]) für einen 2,4 cm dicken Absorber einen mittleren Absorptionskoeffizienten von 0,23 cm^{-1} Pb. Hu Chien Shan und Mitarbeiter[19]) haben Absorptionsmessungen in 4000 m Höhe ausgeführt. Um den Nulleffekt möglichst stark herabzusetzen, arbeiteten sie mit 5 Zählrohren, wobei aber schon 3 Strahlen aus der schauerauslösenden Schicht für eine Fünffachkoinzidenz ausreichten; wieder wurde nur ein Zählrohr mit dem Absorber bedeckt. Sie fanden für Absorberdicken bis herauf zu 2,5 cm Pb eine Abnahme des Absorptionskoeffizienten von 0,68 auf 0,23 cm^{-1} Pb. Die Ergebnisse aller dieser Untersuchungen sind also in guter Uebereinstimmung.

Zeiller, sowie Hu Chien Shan und Mitarbeiter haben auch Absorptionsversuche mit anderen Materialien als Blei ausgeführt und fanden, daß die Absorption in erster Näherung proportional der Ordnungszahl erfolgt. Schauer, die in leichteren Materialien entstanden sind, erweisen sich härter als Schauer aus Blei. So finden Hu Chien Shan und Mitarbeiter für Aluminiumschauer eine fast doppelt so große Härte. Besonders überzeugend sind die harten Schauer aus Kohle und Holz von Schmeiser und Bothe[20]) nachgewiesen worden.

§ 4. Herstellung der günstigsten Versuchsbedingungen.

Eine für Schauerzählung sehr hohe Empfindlichkeit wurde mit einer Zweifachkoinzidenzanordnung erzielt, bei der 7 dicht nebeneinanderliegende Zählrohre in der aus Fig. 1 ersichtlichen Weise

17) *J. E. Morgan u. W. M. Nielsen, Phys. Rev. 50, 882, 1936.*

18) *J. Clay, Physica 3, 352, 1936.*

19) *Hu Chien Shan, B. B. Kisilbasch u. D. Ketiladge, Proc. Roy. Soc. London (A) 161, 95, 1937.*

20) *K. Schmeiser u. W. Bothe, Ann. d. Phys. (5) 32, 161, 1938.*

gruppenweise darauf miteinander verbunden waren, daß von zwei benachbarten Rohren stets das eine zu Gruppe I, das andere zu

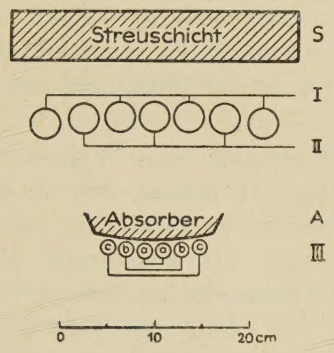

Fig. 1. Zählrohranordnung für Absorptionsmessungen.

Gruppe II gehörte. Registriert wurden die Koinzidenzen von Zählrohrausschlägen der Rohrgruppe I mit solchen der Rohrgruppe II; diese Zweifachkoinzidenzen seien im folgenden durch -I-II- bezeichnet.

Mit dieser Anordnung ergab sich zwar auch ohne schauerauslösendes Material die sehr hohe Zahl von 1500 Zweifachkoinzidenzen in der Stunde, weil schräg laufende Einzelstrahlen eine Koinzidenz auslösen konnten. Es ist aber sehr bemerkenswert, daß beim Einschalten der Bleischicht S eine mit diesem Nulleffekt durchaus vergleichbare Erhöhung der Koinzidenzzahl eintrat, die nur von Sekundär- oder Schauerstrahlen herrühren konnte. Beispielsweise betrug die Zunahme 1030 Koinzidenzen pro Stunde, wenn über die Zählrohre in einem Abstand von 6 cm eine 30×40 cm große Bleiplatte von 1,2 cm Dike gebracht wurde.

Eine Voruntersuchung galt der günstigsten Lage der Bleischlicht relativ zu den in einer Ebene liegenden Zählrohren. Bei Annäherung der Bleischicht an die Zählrohre nahm die Intensität zu und erreichte ihr Maximum bei etwa 6 cm Abstand, um dann wieder abzusinken. Wurden bei einem Abstand von 6 cm die

zunächst dicht nebeneinanderliegenden Rohre um je 1 cm, also auf einen Achsenabstand von 4,6 cm auseinandergerückt, dann nahm zwar der Nulleffekt sehr stark ab, nämlich von 1500 auf 820 Koinzidenzen/Stunde, doch auch der Effekt selbst sank von 1030 auf 900 Koinzidenzen/Stunde. Es erscheint also am günstigsten, die Zählrohre 6 cm unter der Bleischicht möglichst dicht nebeneinander anzubringen.

Die endgültige Anordnung zeigt Fig. 1. Ueber den beiden Zählrohrgruppen I und II befand sich in einem Abstand von 6 cm die 30×40 cm große Bleischicht; unter ihnen waren 6 weitere Zählrohre (Gruppe III) angebracht, die je nach den Versuchen verschieden miteinander verbunden waren. Im einzelnen war die Anordnung der Zählrohre derart getroffen, daß ein geradlinig laufender Strahl nur dann zwei nebeneinanderliegende Rohre der Gruppen I und II durchsetzen konnte, wenn er einen kleineren Winkel als 60° mit der Horizontalen bildete. Dreifachkoinzidenzen -I-II-III- konnten dagegen durch Einzelstrahlen überhaupt nicht ausgelöst werden; hierfür waren mindestens 2 gleichzeitige Strahlen erforderlich. Für einige Messungen war auch von Bedeutung, daß kein aus dem Blei kommender Einzelstrahl 2 Zählrohre der Gruppe III gleichzeitig durchsetzen konnte (vgl. Seite 15).

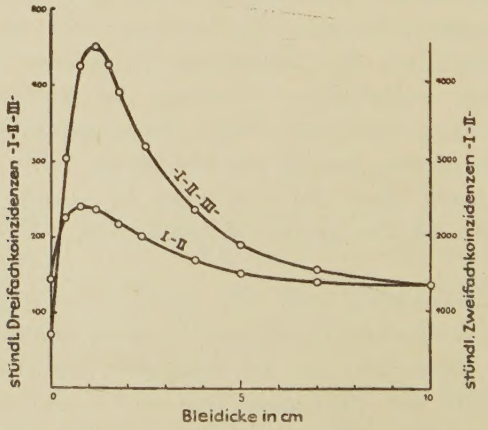

Fig. 2. Abhängigkeit der Koinzidenzzahlen von der Bleidicke.

Mit der beschriebenen Anordnung wurde zunächst die Abhängigkeit der Zweifach- bzw. Dreifachkoinzidenzzahlen von der Bleidicke bestimmt. Die gemessenen Kurven sind in Fig. 2 eingetragen, wobei sich der linke Maßstab auf die Dreifachkoinzidenzen -I-II-III-, der rechte auf die Zweifachkoinzidenzen -I-II- bezieht. Man erkennt, daß bei der Messung der Dreifachkoinzidenzen die Zunahme der Koinzidenzzahl durch das Blei relativ zum Nulleffekt erheblich größer war als bei Messung der Zweifachkoinzidenzen; so betrug bei den Dreifachkoinzidenzen der Nulleffekt 70 und die Zunahme bei optimaler Bleidicke 380 Koinzidenzen/Stunde.

Die Absorptionsmessungen wurden in der Weise ausgeführt, daß über den parallelgeschalteten Zählrohren der Gruppe III in wachsender Schichtdicke das Absorbermaterial aufgebaut wurde. Durch eingehende Versuche wurde festgestellt, daß die Absorptionsmessungen durch sekundäre Schauer aus dem Absorbermaterial nicht merklich gefälscht wurden, wenn, wie es hier geschah, die Absorberschichten nur so breit gewählt wurden, daß sie gerade die Zählrohrgruppe III überdeckten. Ferner wurde sichergestellt, daß der sogenannte Rückstrahleffekt sich hier nicht störend auswirkte.

§ 5. Berücksichtigung des Nulleffektes.

Eine weitere Voruntersuchung galt der Frage, in welcher Weise der ohne schauerauslösendes Material gemessene sogenannte Nulleffekt bei den Absorptionsmessungen zu berücksichtigen ist. Der Nulleffekt besteht zum Teil aus zufälligen (falschen) Koinzidenzen, zum Teil aber auch aus systematischen Koinzidenzen, die von Schauern aus der Luft oder dem Umgebungsmaterial herrühren. Die Zahl der falschen Koinzidenzen war für Anordnung Fig. 1 praktisch unabhängig von der Bleianordnung und lag zwischen 4 und 5 pro Stunde. Dagegen wurden die systematischen Koinzidenzen des Nulleffekts erheblich beeinflußt durch die Dicke der absorbierenden Schicht A und der schauerauslösenden Schicht S.

Die Absorption der systematischen Koinzidenzen in der Bleischicht A wurde in der Weise bestimmt, daß über Gruppe III Bleischichten in wachsender Dicke eingeschaltet wurden, während sich über I und II kein Blei befand.

Fig. 3. Absorption des Nulleffekts.

Die so gemessene Absorptionskurve ist in Fig. 3 dargestellt. Man ersieht, daß der Nulleffekt in den ersten 2 cm Pb auf praktisch die Hälfte absinkt, daß aber auch bei der größten eingeschalteten Absorberdicke von 10 cm ein immerhin noch recht beträchtlicher Restbetrag verbleibt. Ein Teil dieses Resteffekts ist durch die obengenannten falschen Koinzidenzen zu erklären. Die übrigen etwa 23 Koinzidenzen rühren aller Wahrscheinlichkeit nach von Schauern her, die durchdringende Strahlen enthalten. Die Existenz solcher besonders harter Strahlen in manchen Schauern ist von Schwegler[21]) erwiesen worden. Seitlich einfallende Schauer spielten für den Nulleffekt keine Rolle, wie sich aus einer seitlichen Abpanzerung der Zählrohrgruppe III ergab.

Die Absorption der systematischen Koinzidenzen im schauerauslösenden Material S konnte aus Ueberlegungen, die bereits auf Seite 7 angeführt wurden, berechnet werden. Nach den dortigen Ausführungen kommt dem Blei in der Lage S (Fig. 1) mindestens die doppelte Absorptionswirkung zu wie einer gleich dicken Bleischicht in Lage A.

---

21) A. Schwegler, ZS. f. Phys. 96, 62, 1935.

Wenn also Messungen mit einer Bleischicht der Dicke s bei einem Absorber der Dicke a ausgeführt wurden, so durfte nicht einfach von der mit Blei gemessenen Koinzidenzzahl die Koinzidenzzahl ohne Blei abgezogen werden. Es mußte vielmehr die Größe des Nulleffekts aus der Kurve Fig. 3 für $(s + 2a)$ cm Pb entnommen werden. In dieser Weise wird die Absorption des Nulleffekts sowohl im absorbierenden wie im schauerauslösenden Material berücksichtigt.

§ 6. Ergebnisse für Schauer aus Blei und Aluminium.

In Figur 4 sind die auf gleiche Anfangsintensität bezogenen Absorptionskurven dargestellt, die für Schauer aus Blei gewonnen wurden, wobei ebenfalls Blei als Absorber diente. Der bereits in Abzug gebrachte Nulleffekt ist dabei jeweils in der

1: Schauer aus 0,4 cm Pb; $I_0 = 256$ Kz/Std.
2: Schauer aus 1,2 cm Pb; $I_0 = 416$ Kz/Std.
3: Schauer aus 5 cm Pb; $I_0 = 160$ Kz/Std.
4: Schauer aus 10 cm Pb; $I_0 = 109$ Kz/Std.

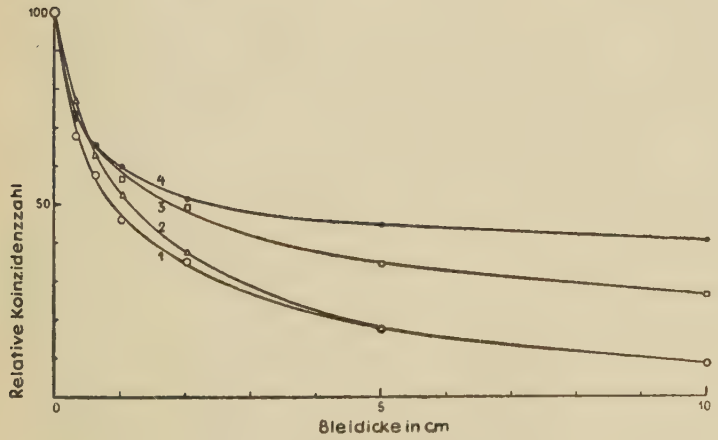

Fig. 4.
Absorption in Blei von Schauern aus Blei verschiedener Dicke.

Weise bestimmt, wie in § 5 näher erläutert wurde. Als wesentliches Ergebnis sei festgestellt, daß die Schauer um so durchdringender sind, aus je größerer Schichtdicke sie kommen. Beispielsweise ist der Absorptionskoeffizient für die Schauer aus 10 cm Pb nur etwa halb so groß wie für die Schauer aus 0,4 cm Pb.

Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Kurven können nicht durch die Unsicherheit der Korrektur für den Nulleffekt hervorgerufen sein. Würde man nämlich den Nulleffekt in der Weise berücksichtigen, daß man von der mit Blei gemessenen Koinzidenzzahl die ohne Blei gemessene abzieht, so würden die Unterschiede in der Härte nur noch schärfer hervortreten.

Man könnte auch vermuten, daß die veränderte Geometrie bei dickem Streuer von Einfluß auf das Ergebnis ist. Dies wurde durch einen Versuch widerlegt, bei dem das 0,4 cm starke Bleiblech um 10 cm gehoben wurde. Dabei zeigte sich keine Aenderung der Durchdringungsfähigkeit.

Schließlich besteht die Möglichkeit, daß die größere Durchdringungsfähigkeit der Schauer aus dickerem Blei durch ihre größere Strahlenzahl vorgetäuscht wird. Die Bedingung für die Messung des wahren Durchdringungsvermögens ist nämlich im Grunde nur dann erfüllt, wenn die Zählrohrgruppe III so weit von der schauererzeugenden Substanz entfernt ist, daß sie, wenn überhaupt, höchstens von einem einzigen Schauerstrahl getroffen wird. In Wirklichkeit läßt sich aber diese Voraussetzung aus Intensitätsgründen nicht erfüllen. Es mußte daher an den Absorptionskurven eine Korrektur angebracht werden, die sich aus folgender Ueberlegung ergab.

Es sei v_0 die Wahrscheinlichkeit, daß bei Eintritt eines Schauers ein Zählrohr z von keinem Schauerstrahl getroffen wird. Diese Wahrscheinlichkeit wird durch das Einschalten eines Absorbers über dem Rohr z vergrößert und steigt auf $v = v_0^{t/t_0}$ wenn durch den Absorber die Strahlenzahl des Schauers von t_0 auf t abnimmt. Das Verhältnis t/t_0, das wir gleich p setzen, ist die gesuchte Wahrscheinlichkeit dafür, daß ein in den Absorber eindringender Schauerstrahl ihn auch wirklich durchsetzt. Da die Koinzidenzzahlen ohne und mit Absorber proportional zu

$(1-v_0)$ bzw. $(1-v)$ sind, so ist ihr der Messung zugängliches Verhältnis

$$p' = \frac{1-v_0^p}{1-v_0} \quad \ldots\ldots\ldots (1)$$

Das in dieser Bestimmungsgleichung für p noch auftretende v_0 kann in folgender Weise ermittelt werden. Wir ersetzen unser bisher benütztes Zählrohr z durch zwei kleine dicht nebeneinanderliegende Zählrohre z_1 und z_2, die zusammen die gleiche Treff-Fläche besitzen. Dann ist die Wahrscheinlichkeit, daß eines dieser kleinen Rohre von einem Schauer verfehlt wird, gleich $\sqrt{v_0}$ und die Wahrscheinlichkeit für einen Treffer auf dieses Rohr $(1-\sqrt{v_0})$, schließlich die Wahrscheinlichkeit für einen gleichzeitigen Treffer auf beide Rohre $(1-\sqrt{v_0})^2$. Das Verhältnis

$$\frac{(1-\sqrt{v_0})^2}{(1-\sqrt{v_0})} = (1-\sqrt{v_0}) \quad \ldots\ldots\ldots (2)$$

ist der Messung zugänglich, denn jedes Verhältnis der unter Mitwirkung von Rohr z_1 gemessenen n-fach-Koinzidenzen zu den unter Mitwirkung von z_1 und z_2 gemessenen $(n+1)$-fach-Koinzidenzen ist gleich diesem Ausdruck.

Bei den von mir durchgeführten Messungen war die Rohrgruppe III (Fig. 1) nicht in zwei gleiche Teile, sondern in die beiden Zählrohrpaare IIIa und IIIb (Fig. 1) unterteilt, was eine

Tabelle I: Zur Korrektion der Absorptionskurven.

1	2	3	4	5
Dicke der schauerausl. Pb-Schicht (cm)	stündl. Koinz.-Zahlen		Treffwahrsch. für III $(1-v_0)$	mittl. Strahl.-zahl durch III beim Ansprechen
	Vierfach-	Dreifach-		
0	3,6	24		
0,4	3,6 + 16,8	24 + 87	0,48	1,35
1,2	3,6 + 53	24 + 176	0,66	1,63
5,0	3,6 + 23	24 + 58	0,78	1,93
10	3,6 + 8,1	24 + 28	0,63	1,56

leichte Abänderung der obigen Rechnung bedingte. Aus den in Spalte 2 und 3 der Tabelle I für verschiedene Bleidicken angegebenen Koinzidenzzahlen sind die in Spalte 4 eingetragenen Treffwahrscheinlichkeiten $(1-v_0)$ für die Zählrohrgruppe III ermittelt. Diese Treffwahrscheinlichkeiten zeigen denselben Gang mit der Bleidicke, wie nach den Messungen von Geiger und Heyden[22]) zu erwarten war. Der Anschaulichkeit halber ist in der letzten Spalte noch angegeben, wieviele Strahlen im Mittel im Falle einer Dreifachkoinzidenz -I-II-III- durch Zählrohrgruppe III hindurchliefen. Diese Zahlen sind mit Hilfe der Poissonschen Gleichung aus den Treffwahrscheinlichkeiten berechnet unter der Voraussetzung, daß der Schauer nur aus ionisierenden Strahlen besteht.

In Figur 5 sind die nach Gleichung (1) korrigierten Absorptionskurven eingetragen. Vergleicht man diese Kurven mit den un-

1: Schauer aus 0,4 cm Pb; $I_0 = 256$ Kz/Std.
2: Schauer aus 1,2 cm Pb; $I_0 = 416$ Kz/Std.
3: Schauer aus 5 cm Pb; $I_0 = 160$ Kz/Std.
4: Schauer aus 10 cm Pb; $I_0 = 109$ Kz/Std.

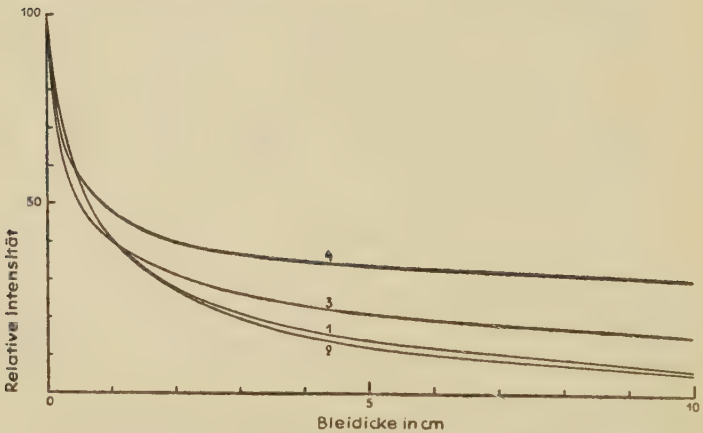

Fig. 5. Korrigierte Absorption in Blei von Schauern aus Blei verschiedener Dicke.

22) *H. Geiger u. M. Heyden, ZS. f. Phys. 110, 312, 1938.*

mittelbar gemessenenen Kurven der Figur 4, so sieht man, daß sie zwar alle eine kleine Verschiebung nach unten erfahren haben, daß aber der Härteunterschied bei verschiedenen Bleidicken praktisch erhalten blieb.

Die Zunahme der Härte mit der Dicke der schauerauslösenden Bleischicht kann auf Grund der Kaskadentheorie wohl kaum verstanden werden. Vielmehr hätte man hiernach zu erwarten, daß schon beim Uebergang von 0,4 zu 1 cm Blei die Schauer weicher werden. Wahrscheinlich treten also mit wachsender Bleidicke die sogenannten harten Schauer (20) immer mehr in den Vordergrund.

In gleicher Weise wie für Blei wurde auch für Aluminium als schauerauslösende Substanz die Absorption in Blei aufgenommen (Figur 6). Der Verlauf der Kurve läßt darauf schließen, daß die Schauer aus Aluminium merklich durchdringender sind als die Schauer aus Blei. Zum Vergleich ist in Figur 6 die für eine massenäquivalente Bleischicht interpolierte Absorptionskurve eingetragen. Dieses Ergebnis bestätigt die mit einer wesentlich anderen Versuchsapparatur ausgeführten Messungen von Hu Chien Shan.

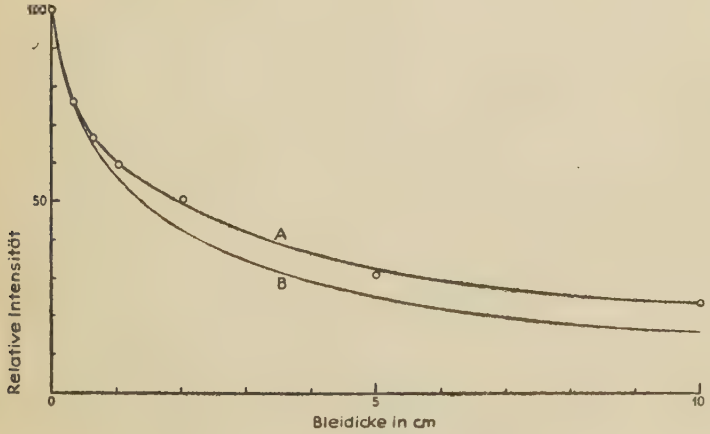

Fig. 6. Absorption in Blei

A: von Schauern aus 10 cm Aluminium (I = 238 Kz/Std.).
B: von Schauern aus 2,4 cm Blei (interpolierte Kurve).

§ 7. Grundlagen des Versuchs zur Messung der Schauerhäufigkeit.

Die ersten Versuche, die Zahl der aus 1 cm^2 Blei je Stunde austretenden Schauer abzuschätzen, wurden von Geiger und Zeiller[23]) ausgeführt. Sie bestimmten unter gut definierten geometrischen Bedingungen durch Messung von Dreifach- und Vierfachkoinzidenzen die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Zählrohr auf einen aus dem Blei austretenden Schauer ansprach. Bezeichnet man diese Wahrscheinlichkeit mit w und bedeutet n_3 die Zahl der Dreifachkoinzidenzen, so ergibt sich wenigstens größenordnungsmäßig die Zahl der aus dem Blei austretenden Schauer zu $Z = n_3/w^3$. Es wurde auf diese Weise festgestellt, daß aus einer 1,5 cm dicken Bleischicht im Mittel 0,6 Schauer je Stunde und Quadratzentimeter austraten.

Während bei Geiger und Zeiller von der Koinzidenzapparatur nur etwa jeder zwanzigste Schauer erfaßt wurde, war bei den folgenden Versuchen die Anordnung so getroffen, daß eine wesentlich größere Zahl der austretenden Schauer in der Zählrohranordnung wirksam wurde. Es waren nämlich in einer Ebene mehrere Zählrohre dicht nebeneinander aufgebaut und wie in der schon beschriebenen Anordnung gruppenweise derart miteinander verbunden, daß von zwei benachbarten Rohren stets das eine zu Gruppe I, das andere zu Gruppe II gehörte. Die gesamte von den Zählrohren bedeckte Fläche war dabei größer als die Fläche der schauerauslösenden Bleischicht; außerdem befand sich diese Schicht so dicht über den Zählrohren, daß praktisch jeder Schauer die Zählrohre durchsetzen mußte. Bei dem geringen Abstand zwischen dem Blei und den Zählrohren konnte es aber noch vorkommen, daß ein kleinerer Schauer alle seine Strahlen nur durch ein einziges Zählrohr hindurchschickte und so für die Koinzidenzzählung verlorenging. Aus diesem Grunde war eine wesentliche Steigerung der Empfindlichkeit zu erwarten, wenn die gleiche Fläche statt mit den bisher benutzten 3-cm-Rohren mit der doppelten Anzahl von 1,5-cm-Rohren be-

23) H. Geiger u. O. Zeiller. ZS. f. Phys. 97, 300, 1935.

legt wurde. Tatsächlich ergab sich bei dieser feineren Aufteilung der Zählfläche eine um 50 % höhere Koinzidenzzahl verglichen mit einer Aufteilung, bei der immer je zwei benachbarte Rohre parallelgeschaltet und diese Rohrpaare dann genau wie oben in zwei Gruppen aufgeteilt waren. Diese letzte Aufteilung entsprach der Anordnung mit den 3-cm-Rohren, da ja jedes Paar von 1,5-cm-Rohren dieselbe Fläche wie ein 3-cm-Rohr überdeckte.

Es mußte jedoch damit gerechnet werden, daß auch die mit 1,5-cm-Rohren ausgestattete Anordnung noch einen — wenn auch kleinen — Bruchteil der Schauer nicht erfaßte. Um diesen Mangel zu beheben, wurde die Apparatur in der aus Figur 7

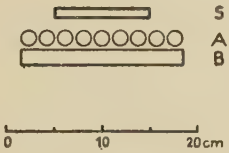

Fig. 7.
Zählrohranordnung zur Bestimmung der Schauerhäufigkeit.

ersichtlichen Weise ausgebaut. Unter dem schauerauslösenden Blei S befanden sich untereinander zwei Sätze A und B von je 9 Zählrohren, und zwar lagen die Rohre B quer zu den Rohren A. Die Rohre lagen dicht nebeneinander und wurden durch Holzleisten zu einer Einheit zusammengehalten, die im folgenden als Zählrohrsatz bezeichnet wird. Jede Zählrohrsatz überdeckte eine Fläche von 17×17 cm und war wie oben in zwei Gruppen von 5 bzw. 4 Zählrohren aufgeteilt. Diese 4 Gruppen A′ A″ B′ B″ waren an einen Verstärker angeschlossen, der folgende Koinzidenzen registrierte:

-A′-A″-, -B′-B″-, -A′-A″-B′-B″-, -A′-A″-B′-, -A′-A″-B″-.

Wenn jeder der Zählrohrsätze A und B sämtliche Schauer erfassen würde, so müßte die Zahl der Vierfachkoinzidenzen

-A′-A″-B′-B″- gleich der Zahl der Zweifachkoinzidenzen -A′-A″- oder -B′-B″- sein. In Wirklichkeit wird jedoch von den stündlich austretenden Schauern von A nur der Bruchteil p und von B nur der Bruchteil q registriert. Die Zahl der stündlichen Zweifachkoinzidenzen ist dann

$$N_A = p\,Z$$
$$\text{und} \quad N_B = q\,Z,$$

wobei Z die gesuchte Zahl der stündlich aus S austretenden Schauer bedeutet. Ferner kann die Zahl der Vierfachkoinzidenzen

$$N_{AB} = p\,q\,Z$$

gesetzt werden, da infolge der Querlage von A gegen B die Wahrscheinlichkeit, daß ein Schauer in B wirksam wird, unabhängig davon ist, ob er bereits in A wirksam war oder nicht. Aus den drei Gleichungen folgt

$$Z = \frac{N_A\,N_B}{N_{AB}} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

§ 8. Häufigkeit der Schauer aus Blei und Aluminium.

Bei der zahlenmäßigen Auswertung der vorstehenden Gleichung (3) waren noch zwei Fehlerquellen zu beachten. Die eine bestand darin, daß der Zählrohrsatz A selbst als Schauerquelle wirkte und somit die Zweifachkoinzidenzen -B′-B″- — aber praktisch auch nur diese — erhöhen konnte; die zweite bestand darin, daß durch Absorption der Schauerstrahlen in den Zählrohrwandungen sämtliche Koinzidenzzahlen zu klein ausfallen mußten. Die erste Fehlerquelle fiel je nach der Dicke der Bleischicht verschieden stark ins Gewicht und wurde in Rechnung gestellt, auch für die zweite Fehlerquelle konnte auf Grund einer besonderen Versuchsreihe eine Korrektion vorgenommen werden.

Zunächst einige Bemerkungen über die schauerauslösende Wirkung des Zählrohrsatzes A. Wurde bei Anordnung Fig. 7 dieser Zählrohrsatz weggenommen, so sank in der Tat der mit dem

Zählrohrsatz B gemessene Nulleffekt (Koinzidenzzahl ohne Blei) von 770 auf 682 ab und war damit praktisch ebenso groß wie der mit dem Zählrohrsatz A gemessene Nulleffekt. Da die mit Zählrohrsatz A gemessene Koinzidenzzahl nur in sehr geringem Maße durch Schauer verfälscht sein konnte, die in A selbst entstanden waren, erschien es richtig, bei der numerischen Auswertung der Gleichung (3) statt der Koinzidenzzahl N_B die Koinzidenzzahl N_A einzusetzen. Eine 120-stündige Meßreihe ergab in der Tat für eine 10×10 cm² große und 0,4 cm starke Bleifläche die Koinzidenzzunahme N_A zu 216 und die Koinzidenzzunahme N_B zu 214, wenn die Zählrohre A entfernt waren.

Was die Absorption der Schauerstrahlen in den Zählrohrwandungen angelangt, so wurde in folgender Weise vorgegangen. Zwischen die Zählrohrsätze A und B wurden zusätzliche Absorptionsschichten (1 mm Messing + 2 mm Glas) gelegt, die in ihrer absorbierenden Wirkung gerade einem Zählrohrsatz äquivalent waren. Da die Zahl der Vierfachkoinzidenzen von den in der Absorptionsschicht entstehenden Schauern praktisch unbeeinflußt blieb, konnte ihre Abnahme als Maß für die Absorption angesehen werden. Tabelle II zeigt für verschiedene Bleidicken die Vierfach-

Tabelle II: Zur Absorption durch die Zählrohre selbst.

1	2	3	4
Dicke der schauerausl. Pb-Schicht (cm)	stündl. Vierfachkoinzidenz —A′—A″—B′—B″—		Korrekturfaktor für Z
	ohne Absorber	mit Absorber	
0,1	19,6	12	0,81
0,4	73	54	0,85
1,2	122	102	0,90
2,4	102	83	0,92
4,8	56	48	0,93
0	68	54	—

koinzidenzen nach Korrektur für den Nulleffekt, und zwar enthält Spalte 2 die Werte ohne Absorberschicht, Spalte 3 die Werte mit Absorberschicht. Es ergibt sich zum Beispiel aus den Zahlen für 1,2 cm Pb unter Berücksichtigung der in § 3 angeführten

Ueberlegung, daß eine Zählrohrwandung rund 5 % der Schauerstrahlen absorbierte und infolge dieser Absorption die Zweifachkoinzidenzen um etwa 10 % und die Vierfachkoinzidenzen um etwa 30 % zu klein ausfallen mußten. Dies bedeutet insgesamt eine Korrektur um den Faktor 0,9 in Gleichung (3). Die Korrekturfaktoren sind in Spalte 4 der Tabelle II aufgeführt.

In Tabelle III sind in den Spalten 2 und 3 die gemessenen Zweifach- und Vierfachkoinzidenzzahlen eingetragen. Sie stützen sich auf Meßreihen von insgesamt 400 Stunden Registrierdauer.

Tabelle III: Häufigkeit der Schauer aus 10×10 cm² Blei.

1	2	3	4	5
Bleidicke in cm	stündl. Koinzidenzzahlen —A′—A″—	—A′—A″—R′—B′	stündl. Schauerzahl aus Gesamtfl.	aus 1 cm²
0,1	75	19,6	232	2,3
0,4	216	73	543	5,4
1,2	271	122	541	5,4
2,5	202	102	368	3,7
5	87	56	125	1,3

Die nach Gleichung (3) berechneten und nach Tabelle II korrigierten Schauerzahlen sind in Spalte 4 eingetragen und in Spalte 5 auf 1 cm² Bleifläche reduziert. Es mußte allerdings kontrolliert werden, inwieweit es berechtigt war, von den mit Bleiflächen von 10×10 cm² gemessenen Schauerzahlen auf 1 cm² überzugehen. Dies geschah in der Weise, daß zwei gleich große Bleiflächen von 0,4 cm Dicke miteinander verglichen wurden, von denen die eine ein Quadrat von $7{,}1 \times 7{,}1$ cm² bildete, die andere einen quadratischen Rahmen solcher Form, daß er das Quadrat von $7{,}1 \times 7{,}1$ cm² zu einem Quadrat von 10×10 cm² ergänzte. Es ergaben sich 109 bzw. 108 Zweifachkoinzidenzen pro Stunde, was innerhalb der Meßfehler von 5 % Uebereinstimmung bedeutet.

Bei den vorstehenden Versuchen war die auszuzählende Bleifläche (10×10 cm²) kleiner gewählt als die von den Zählrohren überdeckte Fläche (17×17 cm²), um nach Möglichkeit alle aus dem Blei kommenden Schauer mit der Zählrohrapparatur zu er-

fassen. Dies brachte aber bei größeren Bleidicken insofern eine Schwierigkeit mit sich, als jetzt die seitlichen Begrenzungsflächen des Bleis eine mit der Basisfläche vergleichbare Größe erhielten und daher auch als Schauerquelle wirkten. Dieser Effekt trat in der Tat sehr deutlich heraus, wie Tabelle IV zeigt, in der die mit

Tabelle IV: Vergleich der mit Bleiflächen verschiedener Größe gemessenen stündl. Schauerzahlen.

1	2	3
Bleidicke in cm	stündl. Schauerzahl aus	
	10×10 cm²	20×20 cm²
0,4	543	1545
1,2	541	1205
2,5	368	599
5	125	119

einer 10×10 cm² bzw. 20×20 cm² großen Bleifläche bei verschiedenen Dicken gemessenen stündlichen Schauerzahlen eingetragen sind. Man sieht, daß bei kleinen Dicken die Vergrößerung der Bleifläche auch eine erhebliche Zunahme der Schauerzahl mit sich bringt, daß die Zunahme aber mit wachsender Dicke immer kleiner wird und bei 5 cm Bleidicke überhaupt nicht mehr bemerkbar ist. Man wird den Schluß ziehen müssen, daß die absolute Schauerzahl nur aus Messungen an Blei geringer Oberfläche und geringer Dicke erschlossen werden kann, daß aber der Gang dieser Zahl mit der Schichtdicke viel sicherer aus Messungen an Bleischichten großer Fläche erkennbar ist.

Die absolute Zahl der Schauer entnimmt man also am besten aus den Messungen für 0,4 und 1,2 cm Pb, wobei man an Hand der Tabelle IV noch den Randeffekt zu berücksichtigen hat. Es ergibt sich dann aus meinen Messungen, daß aus Blei von 1 cm Dicke 5 Schauer pro Stunde und cm² austreten. Da in gleicher Zeit auf die gleiche Fläche rund 40 durchdringende Ultrastrahlen (schwere Elektronen) einfallen, so ist im Mittel jeder achte aus Blei austretende harte Strahl von einem Schauer begleitet.

Geiger und Zeiller fanden einen wesentlich kleineren Wert, nämlich 0,6 Schauer pro Stunde und cm^2. Die Differenz rührt offensichtlich daher, daß bei meiner Methode auch die zwei- und dreistrahligen Schauer erfaßt wurden, während dies bei Geiger und Zeiller nicht der Fall war.

Nach demselben Verfahren wurde auch eine Messung an Aluminium durchgeführt und zwar für die Dicken 1,5 cm und 5 cm. Die stündlichen Koinzidenzzahlen und die daraus errechneten Schauerhäufigkeiten sind in Tabelle V wiedergegeben. Ihr statistischer Fehler beträgt $\pm$ 10 %. Wegen der verhältnismäßig großen Ausdehnung der Bleche (15×15 cm^2) sind die gefundenen Werte wohl etwas zu niedrig. Es ergibt sich also die Zahl der Schauer aus Aluminium nur wenig kleiner als aus Blei.

Tabelle V: Häufigkeit der Schauer aus 15×15 cm^2 Aluminium.

1	2	3	4	5
Aluminiumdicke in cm	stündl. Koinzidenzzahlen —A′—A″—	—A′—A″—B′—B″	stündl. Schauerzahl aus Gesamtfl.	aus 1 cm^2
1,5	172	48	616	2,7
5	294	114	763	3,4

§ 9. Zusammenfassung.

Es wurden Koinzidenzanordnungen verwendet, die dadurch ausgezeichnet waren, daß statt einzelner Zählrohre größere ineinandergreifende Sätze von Zählrohren benutzt wurden (§ 4 und § 7). Mit diesen Anordnungen wurden Absorptionsmessungen an Schauerstrahlen und Schauerzählungen vorgenommen. Die wesentlichen Ergebnisse waren folgende:

1. Die Schauerstrahlen sind um so durchdringender, aus je dickeren Schichten sie kommen; dies wurde im Dickenbereich von 0,4 bis 10 cm überprüft (§ 6).

2. Die Schauerstrahlen aus Aluminium sind merklich härter als die aus Blei (§ 6).

3. Die Zahl der aus cm^2 einer 1 cm starken Bleifläche austretenden Schauer beträgt 5 pro Stunde. Dabei sind auch solche Schauer mit einbezogen, die aus 2 Strahlen bestehen (§ 8).

4. Die Zahl der Schauer aus Aluminium von einigen Zentimetern Dicke beträgt etwa 3 pro cm^2 und Stunde (§ 8).

Die vorliegende Arbeit wurde im Physikalischen Institut der Technischen Hochschule Berlin in den Jahren 1937 und 1938 ausgeführt. Herrn Professor Dr. H. Geiger, der die Anregung zu dieser Arbeit gab, bin ich für seine stete Förderung und sein unermüdliches Interesse am Fortgang der Arbeit zu großem Dank verpflichtet. Herrn Dr. E. Stuhlinger danke ich für seine Hilfsbereitschaft und für wertvolle Diskussionen, ebenso danke ich Herrn Dr. O. Zeiller für manchen technischen Rat.

Die benutzten Apparate waren zum großen Teil Eigentum der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

Lebenslauf

Ich bin am 26. April 1913 als Sohn des Oberbaurats Ernst Weiß in Stuttgart geboren, wo ich auch Ostern 1931 die Reifeprüfung abgelegt habe. Anschließend studierte ich mit einer Unterbrechung von eineinhalb Jahren Physik und Mathematik an der Technischen Hochschule Stuttgart, den Universitäten Göttingen und Tübingen und der Technischen Hochschule Berlin.